

# ニューラルネットワークを用いた 中学生のてんびんの認識の分析

松原 道男

## An Analysis on Students' Cognition of Balance Scales by Using Neural Networks in a Lower Secondary School

Michio MATSUBARA

### I はじめに

学習者の理解は、問題解決における解答の正誤だけでは十分にとらえることができず、学習者の心的な意味構成を分析することが必要である。そのため、質問紙法や面接法を用いて、学習者に解答理由を説明させたり、記述させたりする方法が用いられている。その結果、学習者は、いろいろな自然事象に対して知らないのではなく、学習者なりの論理をもって意味づけを行っていることが明らかにされている<sup>(1)</sup>。しかし、これらの意味づけは、おもに言語化された反応であり、反応の段階で後から論理が付与される場合があると考えられる<sup>(2)</sup>。

このことは、たとえば右の脳の機能と左の脳の機能の分局化から説明することができる。つまり、左の脳は、言語的論理的機能が優位であり、右の脳は、非言語的全体的機能が優位である<sup>(3)</sup>。したがって、右の脳で判断しても言語で反応する際には、左の脳の処理が必要となり、後から左の脳の論理的処理が付加される場合がある。つまり、学習者の反応には、より感覚的である非言語的な全体的判断を行った後に、論理的に意味づけされるものがあると考えられる。

このような感覚的全体的な処理は、従来、直観的判断として指摘されてきたものの一つと考えられ、その重要性はブルナー<sup>(4)</sup>などによって指摘されている。この感覚的全体的処理は、

問題解決を行う際の論理を働かせる大きな枠組みになったり、判断そのものの根拠となったりする場合があると考えられるが、その情報処理過程は明確に示されてこなかった。

そこで、これまでの研究においては、全体的、パターンの処理を行うニューラルネットワーク<sup>(5)</sup>を用いて、その処理過程をモデル的に示すことを試みてきた。ニューラルネットワークは、人間の神経などをモデルとした並列処理を行うもので、特にニューラルネットワークの中でも階層型のネットワークでは、中間層が、特徴検出器の役割を果たすことが指摘されている<sup>(6)</sup>。つまり、中間層は、入力した情報を処理する際に、対象の特徴をいくつかのパターンに分ける機能があると考えられている。この特徴に着目して、感覚的全体的処理の特徴について分析を行ってきた。

### II 研究の目的

これまでの研究においては、学習者の感覚的全体的な処理について、定性的な課題では、岩石やふりこの教材を対象に分析を行ってきた<sup>(7)(8)</sup>。また、定量的な課題においても、感覚的全体的な処理が行われていると考え、相対運動の教材を用いて分析を行ってきた<sup>(9)</sup>。

本研究では、これまでの研究をふまえ、定量的な問題解決において、論理的な処理の分析との比較から、感覚的全体的処理の特徴について

より明確にすることを考えた。

その際、本研究では、てんびんの課題を取り上げることにした。てんびんの課題の論理的な処理の側面については、既に、シーグラー<sup>2)</sup>が、手続き的知識から発達のプロセスや学習における変容について明らかにしている。本研究では、ニューラルネットワークによって、てんびんの認識における特徴検出パターンを求め、学習者が感覚的全体の処理を行う際の対象をとらえる観点について明らかにするとともに、シーグラーの分析との比較から、感覚的全体の処理の特徴について明らかにすることを目的とした。

### Ⅲ 調査方法

#### 1. 調査問題

調査は、シーグラーの研究を参考に、図1に示した問1～問8の8問よりなるてんびんに関する質問紙を用いた。各問題とも、てんびんが「左に傾く」「右に傾く」「つり合う」の3つの選択肢の中から答を一つ選ぶものである。それぞれの問題の形式は表1のようにになっている。問1～問3は左右のおもりの重さ、あるいはうでの長さの少なくとも一つが同じである。問4、

問7は、おもりの重さとうでの長さの大である方が、左右のどちらか一方であり、おもりの、あるいはうでのどちらかに注目しても、正しい選択肢を選ぶ比較的やさしい問題である。問5、問6、問8は、おもりの重さとうでの長さの大である方が、左右に分かれた問題であり、モーメントの考え方を必要とする比較的難しい問題である。

おもりの重さとうでの長さは、問題を通して、左右とも最大が4、最小が1となるように最大値と最小値を決めた。これは、モデル作成において、おもりの重さとうでの長さの考慮の仕方を比較するため、数値の最大値と最小値を同じ

表1 調査問題の形式

問題	おもり	うで
問1	同	同
問2	左大	同
問3	同	左大
問4	右大	右大
問5	左大	右大
問6	右大	左大
問7	左大	左大
問8	右大	左大

次の問1～問8のてんびんは、左右のどちらに傾きますか、あるいは、つり合いますか。ア～ウの中から答を一つ選び、記号に○をつけてください。

【問1】

【問2】

【問3】

【問4】

【問5】

【問6】

【問7】

【問8】

【答】

ア. 右に傾く

イ. 左に傾く

ウ. つり合う

※ 各問題とも選択肢は同じ

図1 調査問題

にしておく方が、比較が容易であると考えたからである。

## 2. 調査時期および調査対象

調査は、1993年5月に石川県内の公立A中学校、第1学年2クラス、男子40人、女子35人、計75人を対象に行った。

## IV 調査結果

### 1. 問題の正答率

各問題を1点として合計8点満点で得点化を行った。表2に合計得点の平均および標準偏差を示した。男女の間で、合計得点の平均には有意差は認められなかった（平均値の差の検定、危険率5%）。全体の平均は6.5であり、平均して問題の8割程度を正答している。

次に、表3に各問題の正答率を示した。一つ以上の条件が同じである問1～問3は、正答率が高く、また、問4、問7のおもりの重さとうでの長さの大である方が、左右のどちらか一方である問題も正答率が高い。問6、問8のおもりの重さとうでの長さの大である方が、左右に分かれた問題では、正答率が低い、問5のようにやや高いものもみられる。全問正答者は、27人（36%）であった。

表2 合計得点の平均および標準偏差

	度数	平均	標準偏差
男子	40	6.37	1.52
女子	35	6.60	1.67
計	75	6.48	1.60

表3 各問題の正答率

問題	問1	問2	問3	問4	問5	問6	問7	問8
正答者数(人)	74	66	67	68	64	38	61	48
割合(%)	99	88	89	91	85	51	81	64

### 2. 解答パターン

#### (1) シーグラのルール評価

シーグラの分析では、学習者の論理的処理が、ルールⅠからルールⅣのルールに分けられ、この順番にルールが発展するとしている。その分析を本調査にあてはめると、解答パターンは

次のようになる。

#### ①ルールⅠ（おもりのみ考慮・1パターン）

〔問1→問8の選択肢〕 ウイウイウイ

#### ②ルールⅡ（おもりが同数ならうでの長さも考慮・1パターン）

〔問1→問8の選択肢〕 ウイウイウイ

#### ③ルールⅢ（おもりの重さが大である方と、うでの長さが大である方が左右に分かれると葛藤・27パターン）

〔問1→問8の選択肢〕 ウイウ\*\*\*

（「\*」はどの選択肢でも可）

#### ④ルールⅣ（モーメントを考慮で全問正答・1パターン）

〔問1→問8の選択肢〕 ウイウウウウ

以上のようにルールⅢについては、本調査ではうでの長さとおもりの重さの葛藤問題が3問あるため、27通りのパターンが考えられる。また、ルールⅠ、ルールⅡ、ルールⅣについては、それぞれ1パターンである。

#### (2) 解答パターンの分析結果

8つの問題の選択肢への反応パターンをみると、31のパターンがみられた。その中で、人数の多い上位の3つの反応パターンに、46人（61%）の生徒が含まれた。その3つのパターンのうち最も多いのは、全問正答のパターンで、27人（36%）であり、次に多いパターンが11人（13%）、次が8人（11%）であった。その他の28の反応パターンは、ほとんどが1人であった。

これらの反応パターンを、シーグラのルール評価で分析を行った結果、次のようになった。

- ・ルールⅠ・・・0人
- ・ルールⅡ・・・0人
- ・ルールⅢ・・・28人（37%）
- ・ルールⅣ・・・27人（36%）
- ・その他・・・20人（27%）

以上のようにルールが特定できる反応パターンについては、生徒はルールⅢ以上を用いていることがわかった。つまり、一定のルールを用いて解答を行っていると考えられる生徒は、上位のルールを用いていることが明らかになった。また、ルールが特定できない生徒も27%と比較的多いことがわかった。

## V モデルの作成と分析方法

### 1. モデルの作成方法

モデルは、図2に示したような階層型のニューラルネットワークによって作成した。モデル作成にあたっては、パーソナルコンピュータ上で、ニューラルネットワークを構築できるソフト「RHINE (CRC社)」を用いた。階層型のネットワークは、図2に示したように、入力層、中間層、出力層よりなり、各層には神経細胞にたとえられるいくつかの細胞(図2の○数字の部分)が存在する。そして、細胞は、隣接する層の細胞のみが連結している。このニューラルネットワークでは、入力層の細胞から入力したデータが、各細胞の連結部分を通り出力層に向かって送られて情報が処理される。その際、各細胞から出力した数値に荷重がかかるようになっており、その荷重は、各細胞の各連結部分で値が異なる。この荷重を調整することにより、いろいろな情報が処理されることになる。

例えば、図2の入力層の4つの細胞からの出力値を $X_1 \sim X_4$ とすると、中間層の細胞①へは、 $X_1 \sim X_4$ のそれぞれに $W_1 \sim W_4$ の荷重がかかり、合計の入力値 $X$ は、

$$X = W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + W_3 \cdot X_3 + W_4 \cdot X_4$$

となる。中間層の細胞②にも、 $X_1 \sim X_4$ に中間層の細胞①とは違った荷重がかかり、情報が送られる。1つの細胞において合計された入力値( $X$ )は、次式のシグモイド関数で処理され、その細胞から出力( $S$ )される。

$$S = 1 / (1 + \exp(-(X - \theta) / T))$$

ここで、「 $\theta$ 」はしきい値とよばれ、各細胞固有の定数である。また、「 $T$ 」は温度とよばれ、全細胞共通の定数である。この式から明らかな出力層

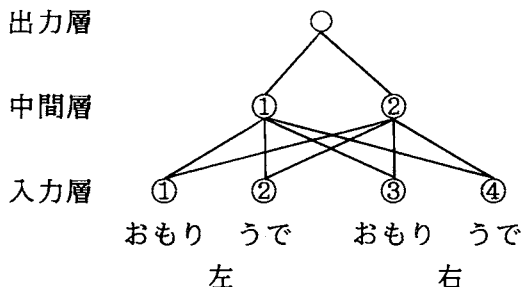


図2 ニューラルネットワークの構造

ように、1つの細胞に集まった数値の和が小さければ小さいほど0に近い値が出力され、大きければ大きいほど1に近い値が出力される。

本研究においては、各層の細胞数について、次のように定めた。入力層の細胞は、左右のてんびんのおもりの重さとうでの長さの条件に合わせて4つ、中間層の細胞は原則として2つ、出力層の細胞は1つとした。中間層の細胞については、後述するように、全問正答の場合に特徴検出パターンが明確な対称構造となるため2つとした。しかし、生徒の反応によっては演算的に収束しにくい場合があり、収束が困難な場合には中間層の細胞を増やして演算を行った。

データは、図2のように、左右のおもりの重さとうでの長さを①～④の4つの入力細胞に対応させ、各問題のおもりの重さとうでの長さの数値を入力した。出力は、各入力に対応させて、生徒が左に傾くとすれば「-1」、右に傾くとすれば「1」、つり合うとすれば「0」とした。たとえば、問1について、ある生徒Aが「つり合う」とした場合、

・入力「2 1 2 1」 → 出力「0」

をデータとした。同様に問2から問8についても生徒Aの解答を「入力値-出力値」に対応させた。

以上のように対応させた8つの「入力値-出力値」が、その生徒において全て成立するように、平均誤差が5%以下になるまで、ニューラルネットワークの荷重を変化させる演算を行った<sup>10)</sup>。

### 2. モデルの分析方法

まず、シーグラーのルールに対応させてモデルの作成を行ってみた。表4は、ルールⅣの全問正答の場合の解答パターンからモデルを作成し、その荷重を示したものである。荷重は、入力層と中間層の細胞間の荷重と、中間層と出力層の細胞間の荷重を示している。次に、中間層の2つの細胞の一つひとつは、特徴検出器であることに注目し、入力層の細胞から中間層の各細胞における4つの荷重について、荷重が「+1.0」以上の場合は興奮性の信号を受け、「-1.0」以下の場合は抑制性の信号を受け、さら

表4 全問正答の場合のモデルの荷重

		中間層	
		①	②
入力層	①左おもり	-3.175	4.278
	②左うで	-3.140	4.075
	③右おもり	2.716	-4.489
	④右うで	5.166	-4.952
出力層		6.391	-8.283

		中間層	
		①	②
入力層	①左おもり	■	□
	②左うで	■	□
	③右おもり	□	■
	④右うで	□	■
出力層		□	■

図3 全問正答の場合の特徴検出パターン

に、「-1.0～+1.0」の間の値はほとんど信号を受けないと考えた。そうすると、この興奮性あるいは抑制性の信号を受ける細胞に対応する条件は、よく考慮される条件と考えることができる<sup>10)</sup>。

以上の点からルールⅣのモデルの荷重を図に示したのが、図3である。図3の「□」は荷重が「+1.0」以上、「■」は「-1.0」以下を示している。

図3の特徴検出パターンについて、中間層の細胞①の特徴検出パターンをみると次のことが指摘できる。まず、4つの条件とも「□」か「■」であり、4条件とも考慮していることがわかる。中間層の細胞①の特徴検出パターンは、右のおもりの重さとうでの長さが同時に興奮性の信号を受けるが、一方、左のおもりの重さとうでの長さは、抑制性の信号を受ける。また、中間層の細胞②の特徴検出パターンは、これとちょうど逆になっている。しかも、中間層の細胞①と細胞②の出力層への特徴検出は、「□」と「■」になっており、お互いの細胞の情報が拮抗するようになっていることがわかる。以上のように、全問正答者の特徴検出パターンは、対称的な構造になっていることがわかる。これは、どちらに傾くかは、左右のおもりの重さと

うでの長さを掛けたものが、拮抗し合う形になるので、ニューラルネットワークの特徴検出パターンが、拮抗し合うような形になると考えられる。

次に、シーグラーのルールⅠ、ルールⅡの解答パターンをモデル化すると、図4に示した特徴検出パターンを得ることができた。つまり、左右のおもりの重さだけに特徴検出がみられ、おもりの重さだけを考慮する特徴がみられる。特徴検出パターンからは、ルールⅠとルールⅡの区別は困難である。

ルールⅢについては、27の解答パターンについてモデルを作成し、特徴検出パターンを分析した結果、次の5つのパターンに分類することができた。それぞれの特徴検出パターンの例は、図5に示す。

①パターンⅠ：全問正答とほぼ同じ特徴検出パターン・・・13

		中間層	
		①	②
入力層	①左おもり	■	□
	②左うで	■	□
	③右おもり	□	■
	④右うで	□	■
出力層		□	■

図4 シグラーのルールⅠ、ルールⅡの特徴検出パターン

パター Ⅰ	中間層 ① ②		13	パター Ⅳ	中間層 ① ②		1
	① 左おもり	■ □			① 左おもり	□ □	
	② 左うで	■ □			② 左うで	■ ■	
	③ 右おもり	□ ■			③ 右おもり	■ ■	
	④ 右うで	□ ■			④ 右うで	■ ■	
出力層		□ ■	出力層		□ ■		
パター Ⅱ	中間層 ① ②		3	パター Ⅴ	中間層 ① ②		2
	① 左おもり	■ □			① 左おもり	■ □	
	② 左うで	■ □			② 左うで	■ ■	
	③ 右おもり	□ ■			③ 右おもり	□ ■	
	④ 右うで	□ □			④ 右うで	■ ■	
出力層		□ ■	出力層		□ ■		
パター Ⅲ	中間層 ① ②		8				
	① 左おもり	■ □					
	② 左うで	■ □					
	③ 右おもり	□ ■					
	④ 右うで	□ □					
出力層		□					

図5 シグラーのルールⅢの特徴検出パターン

- ②パターンⅡ：全問正答とはほぼ同じ特徴検出パターンであるがやや異なる・・・3  
 ③パターンⅢ：重さと距離のまとまりが一部見られる特徴検出パターン・・・8  
 ④パターンⅣ：4つの条件が打ち消し合う特徴検出パターン・・・1  
 ⑤パターンⅤ：おもりの重さのみ注目した特徴検出パターン・・・2

パターンⅠが全問正答の特徴検出パターンとはほぼ同じで、パターンⅤになるにつれて、それがくずれてくる。シーグラの分析では同じルールであるが、ニューラルネットワークではいろいろなパターンがでてくる。これは、シーグラの考え方では、「重さー距離」の葛藤問題では、ランダムに選択肢を選ぶという考え方で分析を行っているが、ニューラルネットワークでは、学習者の解答が何等かの意味ある反応を行っているとして、解答全体のパターンを分析するからである。

したがって、特徴検出パターンは、シーグラのルールⅠやⅡに近い特徴検出（パターンⅤ）から、シーグラのルールⅣに近い特徴検出（パターンⅠ）まで生じると考えられる。しかし、シーグラのルールⅢはルールⅡがルールⅣへと発展するときの過渡的な段階であり、特徴検出パターンもその間のパターンとしてでてくるため、お互いの分析には大きな矛盾点はないと思われる。

以上のことから、本研究では、全問正答のように、ニューラルネットワークの特徴検出パターンが拮抗し合うような形になるものを、てんびんについての正しい観点がある生徒と見なし、各生徒の特徴検出パターンを分析することにした。

## VI モデルの分析結果および考察

解答パターンが同じならば、モデルが同じになるので、31の解答パターンについてモデルを作成した。作成したモデルから、各生徒の特徴検出パターンを求めた。図5のシーグラのルールⅢの特徴検出パターンも参考に分析した結果、図6に示したようにP1～P4の特徴検出パターン

に大きく分類することができた。図6に示したP1～P4は、ある生徒の特徴検出パターンを例にあげて示しており、P1からP4へとてんびんの条件についての正しいとらえ方がみられなくなる。P4については、さらにP4a～P4dに分けることができた。それぞれの特徴検出パターンは、次のような特徴がみられる。

①P1：条件の正しいとらえ方の生徒・・・53人（71%）

②P2：条件の正しいとらえ方がみられるが一部矛盾している生徒・・・5人（7%）

③P3：重さと距離のまとまりが一部見られる生徒・・・5人（7%）

④P4：条件の正しいとらえ方がほとんどみられない生徒・・・12人（16%）

・P4a：左と右のおもりの間、左と右のうでの間には拮抗関係がみられるが、モーメント的考え方がない生徒・・・4人（5%）

・P4b：4つの条件が打ち消し合う生徒・・・4人（5%）

・P4c：主におもりの重さに注目する生徒・・・

	中間層 ① ②			中間層 ① ②	
	①左おもり ②左うで ③右おもり ④右うで	■ □		①左おもり ②左うで ③右おもり ④右うで	■ □
P1	出力層 □ ■		P4a	出力層 □ ■	
P2	中間層 ① ②		P4b	中間層 ① ②	
	①左おもり ②左うで ③右おもり ④右うで	■ □		①左おもり ②左うで ③右おもり ④右うで	■ □
P3	出力層 □ ■		P4c	出力層 □ ■	
	①左おもり ②左うで ③右おもり ④右うで	■ □		①左おもり ②左うで ③右おもり ④右うで	■ □
	出力層 □ ■		P4d	出力層 □ □ □ ■	
				中間層 ① ② ③ ④	
				①左おもり ②左うで ③右おもり ④右うで	■ □

図6 特徴検出パターンの分類

- ・ 3人 (4%)
- ・ P4d: その他・・・1人 (1%)

P1は、ルールⅢを分析したさいのパターンⅠ、P2はパターンⅡ、P3はパターンⅢ、P4bはパターンⅣ、P4cはパターンⅤに対応する。P1は、図3に示した特徴検出パターンと同じであり、てんびんの条件についてのほぼ正しいとらえ方をしていると考えられる。P2については、中間層の2つのうち一つは、てんびんについての正しいとらえ方が見られるが、もう一つの方にそのとらえ方を否定するような特徴が見られる。したがって、てんびんの条件についてのほぼ正しいとらえ方をしているが、問題によって、やや誤ったとらえ方をしていると考えられる。P3については、中間層の2つの特徴検出パターンの少なくとも一つが、おもりの重さとうでの長さが同じ特徴検出(図6の例の場合、中間層①が「□」)になっている。したがって、左あるいは右のおもりの重さとうでの長さにまとまりがみられるが、モーメント的なとらえ方には至らないものである。

次に、P4については、モーメント的なとらえ方がほとんどみられないものであるが、細かくは次のような特徴がみられる。P4aは、左のおもりと右のおもりの特徴検出が互いに拮抗関係にあり、また、左のうでと右のうでの特徴検出が拮抗関係にあるが、左のおもりと左のうで、右のおもりと右のうでの特徴検出が同じでなく、モーメント的なとらえ方がみられない。

P4bは、中間層の特徴検出パターンの2つがほぼ同じであるにもかかわらず、出力層の特徴検出が「□」と「■」で拮抗関係にあり、中間層からの情報を打ち消し合っている。この特徴検出パターンは、おもりの重さやうでの長さの微妙な値によって解答がいろいろ変化することが考えられ、問題によって条件のとらえ方が大きく変わる特徴をもつと考えられる。

P4cは、主に特徴検出がおもりの重さにみられるが、とりわけ、図6に示した例は、おもりの重さだけに着目している特徴がみられる。おもりの重さだけに着目する場合は、シーグラのルールⅠになるが、ルールⅠとして

検出されなかったのは、おもりが軽い方に傾くといった解答を行っているからである。つまり、てんびんが右に傾くとき(すなわち出力層が「□」)、特徴検出パターンが左のおもりが重い方(すなわち、中間層①の特徴検出の「左のおもり」が「□」)になっている。シーグラのルールでは、おもりの重い方に傾くというもののしかルール化されない。

P4dは、特徴検出にまとまりがみられず、問題によって考え方が大きく変化すると考えられる。

次に、P1～P4の生徒の合計得点はどのようになっているかを示したのが表5である。表5より、P1からP4にかけて合計得点が低くなる傾向にあるが、同じ合計得点でもパターンが違うものがあり、合計得点では十分に表れないことが、P1～P4のパターンで示されていることがわかる。8点の全問正答者がP1であるのは当然であるが、合計得点が5点や6点でもP1に属する生徒が何人かいることがわかる。これは、ニューラルネットワークの分析では、答が誤っていても考え方が全体的に正答の場合と類似していれば、そのような特徴検出パターンになるためである。

表5 特徴検出パターンと合計得点との関係

パ タ ー ン	0	1	2	3	4	5	6	7	8	計 (人)
P 1						1	15	10	27	53
P 2						2	1	2		5
P 3					2	2	1			5
P 4		1	2	1	2	2	3	1		12
P4a				1		1	2			4
P4b					2	1	1			4
P4c		1	1					1		3
P4d			1							1

表6 特徴検出パターンとルールとの関係

パ タ ー ン	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	他	計 (人)
P 1			26	27	0	53
P 2					5	5
P 3			1		4	5
P 4			1		11	12
P4a					4	4
P4b					4	4
P4c			1		2	3
P4d					1	1

つまり、全問正答するためには、左のおもりの重さとうでの長さの掛け算、右のおもりの重さとうでの長さの掛け算というような公式の理解が必要と考えられるが、そのような論理的操作が十分でなくても、全体的にそれに近い考え方ができていれば特徴検出パターンが全問正答に類似してくる。一方、合計得点が高くても全問正答のような特徴検出パターンがみられない生徒は、誤答した問題においては、その他の問題と比べ、かけはなれて考え方が異なっている。つまり、少々得点が高くても、問題によって極端に考え方が変わる場合は、全問正答のような特徴検出パターンはみられなくなる。

次に、シーグラのルールとこれらのパターンを対応させたのが表6である。シーグラのルールⅣとルールⅢの解答パターンは、ほとんどがP1になっていることがわかる。また、ルールの特定できない27%の生徒については、P1の条件に対しての正しいとらえ方はみられないが、約半数はP2とP3であり、全問正答でないが感覚的全体的処理においては複数の条件のとらえ方が、比較的正しい生徒がいることがわかる。そして、残りの半数は、たとえばP4bのように問題によって条件のとらえ方が大きく異なる、感覚的全体的処理を行っていることが考えられる。

これは、シーグラの分析は、論理的な側面を分析しており、ニューラルネットワークでは、感覚的全体的な判断における、対象をとらえる観点を分析しているからである。前述したように人間の認識には両側面が存在すると考えられ、両方法から分析することによって、より学習者の認識を明確にすることができると思われる。

#### 参考文献および注

- (1) S. M. グリン他、武村重和監訳：理科学習の心理学、東洋館、77-100、1993
- (2) ノーマン・D・クック、久保田競他訳：ブレインコードー左右半球間の情報処理、紀伊國屋、121-176、1988
- (3) 柏原恵龍：健常脳における言語及び非言語過程の分離に関する研究、風間書房、1-38、1993
- (4) J.S. ブルーナー、平光昭久訳：教育の適切性、

明治図書、155-178、1972

- (5) D. E. ラメルハート他、甘利俊一監訳：P D Pモデル、産業図書、367-419、1988
- (6) J. デイホフ、桂井浩訳：ニューラルネットワークアーキテクチャ入門、森北出版、83-98、1992
- (7) 松原道男：理科における学習者の知識構造に関する研究(2)ーニューラルネットワークを用いた岩石の分類に関する表現方法ー、日本理科教育学会研究紀要、Vol.32、No 3、31-37、1992
- (8) 松原道男：理科における人工知能を用いた中学生の知識構造の分析(2)ーニューラルネットワークを用いてー、金沢大学教育学部教科教育研究、第28号、17-23、1992
- (9) 松原道男：ニューラルネットワークによる中学生の相対運動の認識の分析、金沢大学教育学部紀要教育科学編、第43号、63-69、1994
- (10) Siegler, R. S., The origins of scientific reasoning, In Siegler, R. S., Children's Thinking : What Develops?, Lawrence Erlbaum Associates, 1978, 109-149
- (11) この演算については、バックプロパゲーションという手法を用いて、ソフトが演算を行う。
- (12) (6)と同書